

**Prioritätsbescheinigung über die Einreichung  
einer Patentanmeldung**

**Aktenzeichen:** 100 35 281.2  
**Anmeldetag:** 18. Juli 2000  
**Anmelder/Inhaber:** DaimlerChrysler AG,  
Stuttgart/DE  
**Bezeichnung:** Sensorsystem und Verfahren zur Ermittlung von  
Systemzuständen  
**IPC:** G 01 D 21/00

**CERTIFIED COPY OF  
PRIORITY DOCUMENT**

**Die angehefteten Stücke sind eine richtige und genaue Wiedergabe der ur-  
sprünglichen Unterlagen dieser Patentanmeldung.**

München, den 19. April 2001  
**Deutsches Patent- und Markenamt**  
Der Präsident  
Im Auftrag

Jööst

## Sensorsystem und Verfahren zur Ermittlung von Systemzuständen

Die Erfindung betrifft ein Sensorsystem und ein Verfahren zur Ermittlung von Systemzuständen, im folgenden Zustände genannt.

Bei Systemen, deren Zustandsgrößen mittels zumindest eines Sensors eines Sensorsystems mit einer zugeordneten Recheneinheit zu erfassen sind, ist die möglichst genaue Bestimmung derselben aus zumindest einer Meßgröße je Zeitpunkt von großer Bedeutung für die Funktionsfähigkeit des Systems. Dies gilt insbesondere für sicherheitskritische Systeme, beispielsweise Luftdatensysteme eines Flugzeugs, da bei nicht ausreichender Genauigkeit der Meßgrößen weitere Maßnahmen, wie z.B. weitere Sensoren, erforderlich sind, um die geforderte Sicherheit des Gesamtsystems zu erreichen. Weitere Beispiele finden sich bei der Bestimmung von Zuständen bei chemischen und nuklearen Reaktionen oder in der Navigation bei der Bestimmung der Position aus mehreren Steckenmessungen wie GPS oder Radar.

Bei Systemen mit Sensorsystem mit zumindest einem Sensor und diesem zugeordneten Recheneinheit zur Ermittlung zumindest einer Zustandsgröße des Systems sind Verfahren bekannt, die über die Invertierung einer eindimensionalen Kalibrierkurve eines Sensors dem Meßwert des Sensors gegebenenfalls in Abhängigkeit weiterer Parameter des Systems eine bestimmte Zustandsgröße zuordnet. Beispielsweise erfolgt bei einem Luftdatensystem eines Flugzeugs die Messung des momentanen Flugzeug-Zustands mittels Luftdaten-Sensoren, die z.B. statische und dynamische Drücke in der Nähe des Flugzeug-Rumpfes messen. Über die eindimensionale Invertierung der zuvor bestimmten Kalibrierungen der Messung in Abhängigkeit eines Zustandes, also z.B. eine Druckmessung in Abhängigkeit des statischen Druckes, werden aus diesen Meßgrößen Zustandsgrößen der ungestörten Strömung, wie z.B. Strömungswinkel, Machzahl, Höhe und dynamischer Druck, ermittelt.

Nachteilig an diesem Verfahren ist, daß die eindimensionale Invertierung von mehrdimensionalen Kalibrierungen nur eine ungenaue Ermittlung der Zustände zuläßt. Auch können Stabilitätsprobleme auftreten.

Es würde deshalb ein Verfahren für ein Luftdatensystem entwickelt, bei dem mit Hilfe einer Kostenfunktion  $\chi^2(x, y, u)$ , die Kalibrier-Kurven oder -Flächen umfaßt, eine Bestimmung der momentanen Zustandsgrößen  $x$  des Systems aus zumindest einem Sensorsignal vorgenommen wird, um die Genauigkeit und Zuverlässigkeit der zu bestimmenden Zustände  $x$  zu optimieren. Dieses Verfahren ist beispielsweise in Schatt, 18.07.2000

(FrieHMelt H., Jost M., Flush Air Data System- Fortschrittliches Luftdatensystem für die Luft- und Raumfahrt, DGLR Jahrestagung 1999, Berlin, Vortrag 99-180, Seite 5) veröffentlicht. Bei diesem Verfahren werden Kalibrierkurven oder -flächen des Sensorsignals  $y$ , der allgemein ein Vektor ist, und von den gesuchten Zustandsgrößen  $x$  und bekannten Konfigurationen bzw. Reglereingaben  $u$  abhängt verwendet.

Bei dem Luftdatensystem, für das dieses Verfahren vorgeschlagen ist, stellt  $x$  die Luftdaten  $\alpha$ ,  $\beta$ ,  $q_c$  und  $p_s$ ,  $y$  die Druckmessungen, d.h. die Meßgrößen, und  $u$  Flugzeugkonfigurationen, also systemabhängige Parameter, dar.

Zur Bestimmung der momentanen Zustandsgrößen  $x$  ist in dem vorgeschlagenen Luftdatensystem eine Minimierung der Kostenfunktion  $\chi^2(x, y, u)$  mittels eines Gradientenabstiegsverfahrens vorgesehen. Die Kostenfunktion  $\chi^2(x_0, y, u)$  wird ausgehend von einer zufällig gewählten Anfangsinitialisierung  $x_0$  des Zustandes durch eine rekursive Variation von  $x$  entlang des Gradienten von  $\chi^2$  so lange erniedrigt bis ein lokales Minimum von  $\chi^2$  bezüglich  $x$  erreicht wird.

Nachteilig an diesem Verfahren ist, daß mehrere Iterationszyklen zum Erreichen des globalen Minimums notwendig sind, wodurch die Rechenzeit des Systems erhöht wird. Auch ist nachteilig, daß das Erreichen eines globalen Minimums von  $\chi^2$  nicht garantiert werden kann. Das beschriebene Verfahren ist insbesondere in solchen Fällen nachteilig, bei denen die Kalibrierflächen sehr zerklüftet sein können. Dies tritt bei einem Luftdatensystem z.B. in der Transonik auf.

Es ist daher die Aufgabe der Erfindung, ein Verfahren zur Implementierung in einem Meßsystem sowie ein Meßsystem bereitzustellen, welches die Bestimmung des Zustandswertes aus einem Meßwert weiter optimiert und garantiert.

Diese Aufgabe wird mit den Merkmalen der unabhängigen Ansprüche gelöst. Weitere Ausführungsformen sind in den Unteransprüchen angegeben.

Im folgenden wird die Erfindung anhand der beiliegenden Figuren beschrieben, die zeigen:

- Figur 1 eine schematische Darstellung eines Systems mit einem Sensorsystem, für das das erfindungsgemäße Verfahren vorgesehen ist,
- Figur 2 eine Darstellung einer Abfolge des erfindungsgemäßen Verfahrens.

Das in der Figur 1 dargestellte System 1 weist ein Sensorsystem 2 mit zumindest einem Sensor 3 und einer Recheneinheit 4 auf. Der Sensor 3 liefert zumindest einen

Meßwert, aus dem die Recheneinheit 4 eine oder mehrere Zustandsgrößen ermittelt. In der Recheneinheit 4 ist das erfindungsgemäße Verfahren implementiert und kann zusätzlich eine Regelungsvorrichtung zur Regelung von Zuständen bzw. Zustandsgrößen des Systems 1 umfassen. Die Recheneinheit 4 erstellt Stellsignale oder Kommandos für eine Stelleinheit 7 zur Veränderung zumindest einer Zustandsgröße des Systems 1. Eine Änderung des Systemzustands, die mit dem Bezugszeichen 10 bezeichnet ist, wird wiederum von dem zumindest einen Sensor 3 erfaßt.

Das System 1 kann für eine Vielzahl von Anwendungen vorgesehen sein, z.B. die Ermittlung von Zustandsgrößen eines Flugzeugs aus Druckmessungen, die Bestimmung von Konzentrationen oder Temperaturen bei chemischen Prozessen, die Ortsfindung in der Navigation durch Vergleich verschiedener GPS oder Radar Abstandsmessungen oder die Bestimmung von Deformationen und Kräften in der Strukturmechanik.

In der Recheneinheit 4 sind zur Durchführung des erfindungsgemäßen Verfahrens Kalibrier-Flächen oder -Kurven zur Verwendung in einer Kostenfunktion abgespeichert, die mit Hilfe von Versuchen ermittelt worden sind und die einen funktionalen Zusammenhang darstellt, mit dem aus zumindest einer Zustandsgröße Meß- oder Sensor-Werte bestimmt werden.

Die Kostenfunktion  $\chi^2(\mathbf{x}, \mathbf{y}, \mathbf{u})$  wird in einem Verfahrensschritt 10 vorzugsweise in der Recheneinheit 4 in einer Weise gebildet, so daß sie die Abweichung eines tatsächlichen Meßwerts von den Kalibrierkurven oder -flächen, im folgenden kurz Kalibrierungen genannt, in Abhängigkeit des unbekannten Zustands angibt. Dabei kann die Kostenfunktion eine Gewichtung einer Abweichung des Meßwerts von der Kalibrierung durch die Meßwert- bzw. Kalibrierengenauigkeit enthalten. Die verwendeten Größen  $\mathbf{x}$ ,  $\mathbf{y}$  und  $\mathbf{u}$  sind vorzugsweise vektorielle Größen.

Für ein Luftdatensystems eines Flugzeugs kann die Kostenfunktion beispielsweise in folgender Form vorliegen:

$$\chi^2 = [\mathbf{y} - (\mathbf{c}_p \mathbf{q}_c + \mathbf{p}_s)]^T [\text{Cov}(\mathbf{c}_p) \mathbf{q}_c^2 + \sigma_p^2]^{-1} [\mathbf{y} - (\mathbf{c}_p \mathbf{q}_c + \mathbf{p}_s)]$$

Dabei sind  $\mathbf{y}$  die Druckmessungen,  $\mathbf{c}_p(\mathbf{x}, \mathbf{u})$  zuvor bestimmte Kalibrier-Kurven oder -Flächen in Form eines funktionalen Zusammenhangs und  $\text{Cov}(\mathbf{c}_p)(\mathbf{x}, \mathbf{u})$  zuvor bestimmte Genauigkeiten der Kalibrierflächen. Der Zustand  $\mathbf{x}$  wird aus den Luftdaten  $\alpha$ ,  $\beta$ ,  $q_c$  und  $p_s$  gebildet und  $\sigma_p$  beschreibt die Druckwandlergenauigkeit der Druck-Öffnungen.

Für das erfindungsgemäße Verfahren für jegliche Anwendung ist ein entsprechender funktionaler Zusammenhang zwischen Meßgrößen und Systemzuständen in einer Speichereinheit abgelegt und wird zusammen mit den Systemparametern  $u$  in einem Schritt 13 zur Bildung der Kostenfunktion der Recheneinheit 14 zugeführt. Weiterhin wird der Recheneinheit die jeweilige Messung 17 zugeführt. Diese Kostenfunktion ist für jede Messung  $y$ , also z.B. in jedem Zeitschritt, neu zu erstellen, da sie abhängt von den jeweiligen Meßwerten  $y$  und gegebenenfalls dem jeweils relevanten System-Parameter  $u$ .

Für jede Kostenfunktion einer Messung wird das Minimum der Kostenfunktion wie folgt ermittelt:

Vorzugsweise ist vor Ablauf des erfindungsgemäßen Verfahrens bzw. im System 1 eine Approximationsfunktion der Kostenfunktion festgelegt, die so beschaffen ist, daß Minima derselben ermittelt werden können. Alternativ können während des erfindungsgemäßen Verfahrens auch mehrere Approximationsfunktionen in verschiedenen Zustandsbereichen zur Auswahl stehen, die in einem Schritt 19 ausgewählt werden. In einem Schritt 20 wird die Approximationsfunktion auf der Basis der festgelegten Funktionsart für vorzugsweise vor Ablauf des Verfahrens festgelegte Approximationsbereiche aufgestellt. Die Festlegung der Approximationsbereiche hängt von der Kostenfunktion und der ausgewählten Approximationsfunktion sowie einem maximal tolerierbaren Fehler über den gesamten relevanten Zustandsbereich ab. Die Summe der Approximations-Bereiche decken dabei den gesamten relevanten Zustandsbereich ab. Dabei kann auch nur ein Approximationsbereich für den gesamten relevanten Zustandsbereich vorgesehen sein.

Wenn alternativ die Festlegung der Approximations-Bereiche im Verlauf des erfindungsgemäßen Verfahrens bzw. im System 1 erfolgt, werden die Approximations-Bereiche innerhalb des Zustandsbereichs  $x$  in einem Schritt 30 angepaßt. Dies geschieht mit rekursiven Verfahren, wobei beispielsweise eine weitere zur Verfügung stehende Approximationsfunktion verwendet wird oder der Approximations-Bereich reduziert wird. Dabei können die Ansätze der bekannten Verfahren der neuronalen Netze zugrunde gelegt werden.

Die Anzahl der bei der Minimum-Bestimmung verwendeten Approximations-Bereiche kann auch bei der Verwendung von speziellen, z.B. quadratischen Approximationsfunktionen reduziert werden, wenn ausgeschlossen werden kann, daß in einigen Approximations-Bereichen kein Minimum vorliegen kann.

In allen Approximations-Bereichen, in denen sich Minima befinden können, werden dann in einem Schritt 40 alle Minima in diesen Approximations-Bereichen bestimmt.

Sofern dabei im relevanten Zustandsbereich mehrere lokale Minima ermittelt worden sind, erfolgt in einem Schritt 50 eine Bestimmung des globalen Minimums aus dem Vergleich der lokalen Minima in einer Zustands-Bestimmung 25. Dabei wird durch einen Vergleich der Kostenfunktionen  $\chi^2(\mathbf{x})$  aller lokalen Minima  $\mathbf{x}$  über alle Approximations-Bereiche das globale Minimum von  $\chi^2(\mathbf{x})$  identifiziert. Die nachfolgende Zustands-Bestimmung 60 ermittelt dann die dem jeweiligen Meßwert zugehörige Zustandsgrösse  $\mathbf{x}$ . Im Beispiel der Luftdatenmessung ist das Ergebnis dieser Minimierung der gesuchte Luftdatenvektor  $\mathbf{x}$  mit den Luftdaten  $\alpha$ ,  $\beta$ ,  $q_c$  und  $p_s$ .

Vorzugsweise liegt bei dem erfindungsgemäßen Verfahren die Approximationsfunktion sowie die Einteilung der Kostenfunktion in Approximations-Bereiche fest. Entsprechende funktionale Vorkehrungen können in der Recheneinheit 4 zur Verfügung stehen.

Wenn bekannt ist, daß eine spezielle verwendete Approximationsfunktion in einem Approximations-Bereich nur ein einziges Minimum haben kann, ist zur Ermittlung des lokalen Minimums in einem Approximations-Bereich ein Gradientenverfahren mit Hilfe eines beliebigen oder aufgrund einer Abschätzung festgelegten Startvektors im jeweiligen Approximations-Bereich vorteilhaft. Alternativ kann auch ein Halbierungsverfahren oder ein vergleichbares Verfahren angewendet werden.

Bei entsprechenden Approximations-Funktionen, bei denen auch mehrere Minima in dem relevanten Approximations-Bereich des betreffenden Gitterpunktes vorliegen können, können erfindungsgemäß analytische Verfahren zur Minimum-Bestimmung verwendet werden. Z.B. erlaubt eine quadratische Approximations-Funktion der Kostenfunktion die analytische Bestimmung des Minimums der Kostenfunktion in jeweiligen Approximations-Bereich. Ähnliche analytische Bestimmungen von Minima sind auch mit Cosinus und Sinus Approximationsfunktionen möglich.

Ausgehend von einem beliebigen Startvektor  $\mathbf{x}_0$  in dem jeweiligen Approximations-Bereich kann das Minimum dann gebildet werden durch die Summe des Startvektors  $\mathbf{x}_0$  und einer gewichteten Differenz des Meßwerts von der Kalibrierung in Abhängigkeit des Startvektors. Konkret kann dies für das Beispiel eines Luftdatensystems mit folgendem Rechenschritt erfolgen:

$$\mathbf{x} = \mathbf{x}_0 + \mathbf{P} \mathbf{H} \mathbf{R}^{-1}(\mathbf{x}_0) [\mathbf{y} - (\mathbf{c}_p(\mathbf{x}_0) \mathbf{q}_{co} + \mathbf{p}_{so})]$$

Zur Erläuterung dieses Lösungsschritts wird ausgeführt:

Die Kovarianz  $\text{Cov}(\mathbf{y})$  einer geeigneten Anzahl von Druckmessungen  $\mathbf{y}$  als Maßzahl der Genauigkeit ergibt sich aus der Lösung der Kostenfunktion im Schritt 10:

$$\mathbf{R}(\mathbf{x}_0) = \text{Cov}(\mathbf{y}) = q_c^2 \text{Cov}(c_p)(\mathbf{x}_0) + \sigma_p^2$$

In einem weiteren Schritt ergibt sich die Jacobimatrix der Druckmessungen durch:

$$\mathbf{H}(\mathbf{x}_0) = d\mathbf{y}/d\mathbf{x}(\mathbf{x}_0) \text{ von dem Druckmodell } \mathbf{y} = q_c c_p(\mathbf{x}) + p_s$$

Weiterhin ist die Kovarianz bzw. Genauigkeit der Luftdaten  $\mathbf{x}$  bestimmbar durch:

$$\mathbf{P}(\mathbf{x}_0) = \text{Cov}(\mathbf{x}) = (\mathbf{H}^T \mathbf{R}^{-1} \mathbf{H})^{-1}$$

Daraus ergibt sich der angegebene Lösungsschritt für das erfindungsgemäße Verfahren zur Berechnung des lokalen Miniums aus dem Startvektor:

$$\mathbf{x} = \mathbf{x}_0 + \mathbf{P} \mathbf{H} \mathbf{R}^{-1}(\mathbf{x}_0) [\mathbf{y} - (c_p(\mathbf{x}_0) q_{co} + p_{so})]$$

Um Rechenzeit zu sparen, kann der Term  $\mathbf{P} \mathbf{H} \mathbf{R}^{-1}(\mathbf{x}_0)$  und die Kalibrierfläche  $c_p(\mathbf{x}_0)$  in Form einer Tabelle abgelegt sein.

## Patentansprüche

1. Verfahren zur Ermittlung einer Zustandsgröße  $x$  aus zumindest einem Sensor-Wert mit Hilfe einer für einen Meßwert  $y$  erstellten Kostenfunktion zur Implementierung in einer Recheneinheit eines Sensorsystems mit zumindest einem Sensor, wobei die Kostenfunktion vom jeweiligen zu messenden Zustand  $x$  abhängt und die Abweichung eines tatsächlichen Meßwerts von den Kalibrierungen in Abhängigkeit des Zustands  $x$  angibt, um aus dessen Minimum den gesuchten Zustand  $x$  zu ermitteln,

dadurch gekennzeichnet,

daß für die Kostenfunktion zumindest eine Approximations-Funktion auf der Basis zumindest eines Approximations-Bereichs innerhalb des Zustandsbereichs  $x$  aufgestellt wird, durch die eine Approximation der Kostenfunktion mit den Approximations-Funktionen mit vernachlässigbarem Fehler erfolgt, wobei die Summe der Approximations-Bereiche den gesamten relevanten Zustandsbereich abdecken,

daß zumindest in einer Auswahl von Approximations-Bereichen alle lokalen Minima auf der Basis der Approximation bestimmt werden,

daß gegebenenfalls eine Bestimmung des globalen Minimums aus dem Vergleich der lokalen Minima erfolgt.

2. Verfahren zur Ermittlung einer Zustandsgröße  $x$  aus zumindest einem Sensor-Wert nach dem Anspruch 1, dadurch gekennzeichnet,

daß zur Ermittlung des Minimums der Kostenfunktion eine Bestimmung aller Minima in jedem Approximations-Bereich erfolgt.

3. Verfahren zur Ermittlung einer Zustandsgröße  $x$  aus zumindest einem Sensor-Wert nach dem Anspruch 1, dadurch gekennzeichnet,

daß eine quadratische Approximation der Kostenfunktion erfolgt und zur Ermittlung des Minimums der Kostenfunktion in einer Auswahl von entsprechend festgelegten Approximations-Bereichen die Minima in jedem Approximations-Bereich zu ermöglichen, wobei eine Bestimmung des lokalen Minimums auf der Basis der quadratischen Approximationsfunktion erfolgt und jedes lokale Minimum  $x$  in der Nachbarschaft der ausgewählten Gitterpunkte ausgehend von einem Startvektor  $x_0$  bestimmt wird durch die Summe des jeweiligen Startvektors  $x_0$  und einer gewichteten Differenz des Meßwerts von der Kalibrierung in Abhängigkeit des Startvektors.



4. Verfahren zur Implementierung in einer Recheneinheit eines Sensorsystems nach dem Anspruch 1, 2 oder 3, **dadurch gekennzeichnet**, daß die Approximationsfunktionen und die Nachbarschaften so festgelegt werden, daß die Approximationsfunktion in der Nachbarschaft des jeweiligen Gitterpunktes nur ein Minimum besitzt, und daß die Bestimmung des lokalen Minimums mittels eines Gradientenverfahrens erfolgt.
5. Verfahren zur Implementierung in einer Recheneinheit eines Sensorsystems nach dem Anspruch 1 oder 2, **dadurch gekennzeichnet**, daß die Approximationsfunktion eine Funktion ist, deren Minima mittels analytischer Verfahren bestimmbar sind.
6. Verfahren zur Implementierung in einer Recheneinheit eines Sensorsystems nach einem der voranstehenden Ansprüche, **dadurch gekennzeichnet**, daß die zumindest eine Approximations-Funktion und der zumindest eine Approximations-Bereich in einem rekursiven Verfahren vor der Aufstellung der Kostenfunktion erfolgt.
7. Sensorsystem mit zumindest einem Sensor (3) zur Erfassung eines System-Zustands und mit einer Recheneinheit (4), wobei die Recheneinheit (4) das Verfahren zur Bestimmung einer Zustandsgröße aus zumindest einem Sensor-Wert nach einem der vorabstehenden Ansprüche umfaßt.

1 / 2

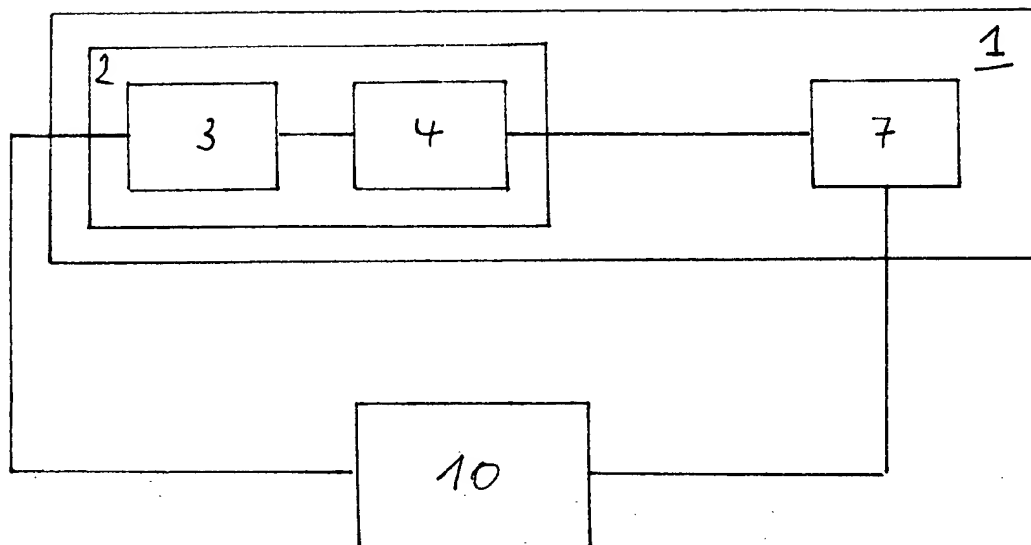


Fig. 1

2 / 2

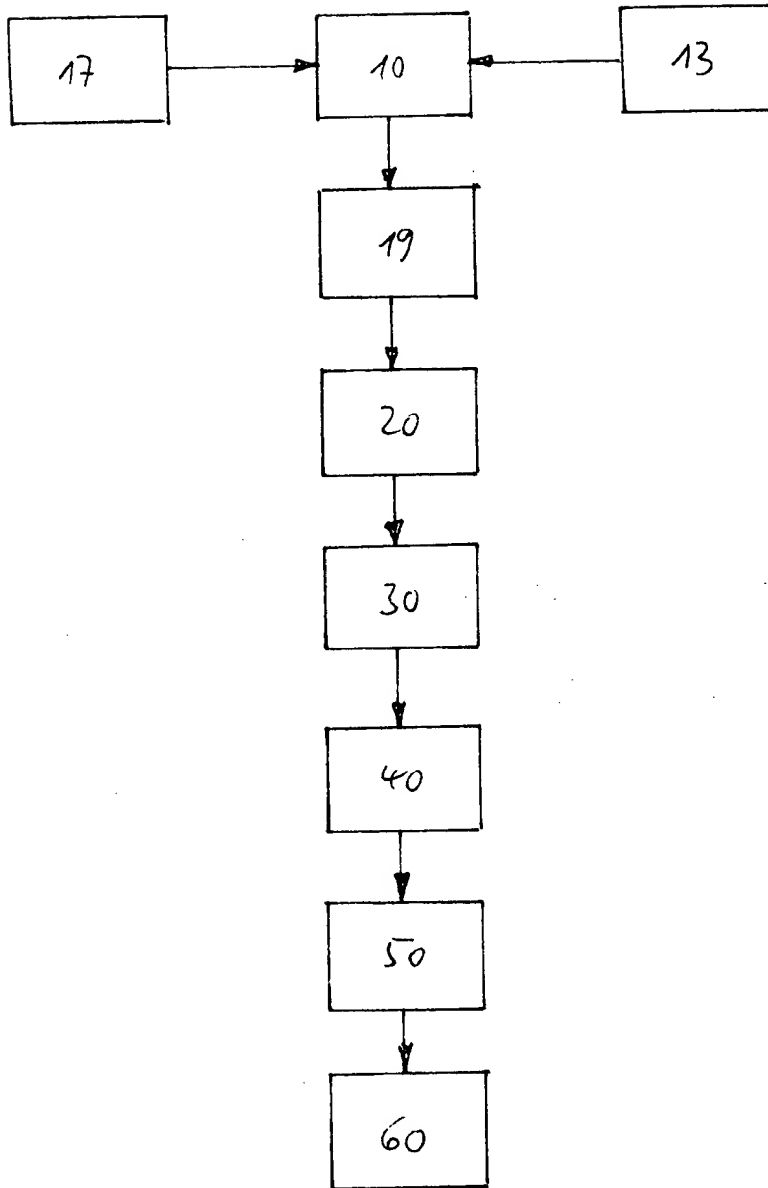


Fig. 2

### Zusammenfassung

Verfahren zur Ermittlung einer Zustandsgröße  $x$  aus zumindest einem Sensor-Wert mit Hilfe einer für einen Meßwert  $y$  erstellten Kostenfunktion zur Implementierung in einer Recheneinheit eines Sensorsystems mit zumindest einem Sensor, wobei die Kostenfunktion vom jeweiligen zu messenden Zustand  $x$  abhängt und die Abweichung eines tatsächlichen Meßwerts von den Kalibrierungen in Abhängigkeit des Zustands  $x$  angibt, um aus dessen Minimum den gesuchten Zustand  $x$  zu ermitteln, wobei für die Kostenfunktion zumindest eine Approximations-Funktion auf der Basis zumindest eines Approximations-Bereichs innerhalb des Zustandsbereichs  $x$  aufgestellt wird, durch die eine Approximation der Kostenfunktion mit den Approximations-Funktionen mit vernachlässigbarem Fehler erfolgt, wobei die Summe der Approximations-Bereiche den gesamten relevanten Zustandsbereich abdecken, wobei zumindest in einer Auswahl von Approximations-Bereichen alle lokalen Minima auf der Basis der Approximation bestimmt werden, wobei gegebenenfalls eine Bestimmung des globalen Minimums aus dem Vergleich der lokalen Minima erfolgt.

(Fig. 1)